MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

Terindeks: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v6i2.9371

OPTIMASI PERBANDINGAN MONOMER FUNGSIONAL DAN PENGIKAT SILANG (*CROSSLINKER*) UNTUK SINTESIS IIPs-Zn2+ MENGGUNAKAN METODE FOTOPOLIMERISASI

Optimization of the Ratio of Functional Monomer and Crosslinking Agent (Crosslinker) for the Synthesis of IIPs-Zn2+ Using the Photopolymerization Method

Rajab Miko & Alizar Ulianas
Universitas Negeri Padang
rajabmiko123@gmail.com; alizarulianas@fmipa.unp.ac.id

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Feb 10, 2026	Mar 10, 2026	Mar 22, 2026	Mar 27, 2026

Abstract

Environmental pollution by heavy metals, particularly Zn2+ ions, has become a serious problem due to increasing industrial activity and their potential toxic effects on ecosystems and human health, thus requiring effective and selective separation methods. This study aims to analyze the effect of variations in the amounts of methacrylic acid (MAA) as the functional monomer and ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) as the crosslinker on the adsorption capacity of Ion Imprinted Polymers (IIPs)-Zn synthesized using the photopolymerization method. This study employed a quantitative approach with an experimental design through variations in the composition of MAA and EGDMA, after which the adsorption capacity was tested and analyzed comparatively. The results showed that the optimum adsorption capacity was obtained with the use of 10 mmol MAA at 3.50 mg/g and 15 mmol EGDMA at 3.65 mg/g. Increasing the amounts of MAA and EGDMA beyond the optimum conditions caused a decrease in adsorption capacity due to the formation of an overly dense

Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

polymer structure and low porosity, thereby hindering the diffusion of Zn2+ ions into the active sites. These findings indicate that the balance between the amount of functional monomer and crosslinker largely determines the successful formation of selective and efficient imprinting sites. Thus, this study contributes to understanding the mechanism of IIPs formation and provides practical implications for the development of selective adsorbents for the treatment of waste containing heavy metals.

Keywords: Zn2+ Adsorption; Ion Imprinted Polymers; Functional Monomer; Crosslinker; Photopolymerization

Abstrak: Pencemaran lingkungan oleh logam berat, khususnya ion Zn2+, menjadi permasalahan serius akibat meningkatnya aktivitas industri dan potensi dampak toksiknya terhadap ekosistem serta kesehatan manusia, sehingga diperlukan metode pemisahan yang efektif dan selektif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah *methacrylic acid* (*MAA*) sebagai monomer fungsional dan *ethylene glycol dimethacrylate* (*EGDMA*) sebagai *crosslinker* terhadap kapasitas adsorpsi *Ion Imprinted Polymers* (*IIPs*)-Zn yang disintesis menggunakan metode fotopolimerisasi. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimen melalui variasi komposisi *MAA* dan *EGDMA*, kemudian diuji kapasitas adsorpsinya dan dianalisis secara komparatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi optimum diperoleh pada penggunaan 10 mmol *MAA* sebesar 3,50 mg/g dan 15 mmol *EGDMA* sebesar 3,65 mg/g. Peningkatan jumlah *MAA* dan *EGDMA* di atas kondisi optimum menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi akibat terbentuknya struktur polimer yang terlalu padat dan porositas yang rendah, sehingga menghambat difusi ion Zn2+ ke dalam situs aktif. Temuan ini menunjukkan bahwa keseimbangan antara jumlah monomer fungsional dan *crosslinker* sangat menentukan keberhasilan pembentukan situs *imprinting* yang selektif dan efisien. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada pemahaman mekanisme pembentukan *IIPs* serta memberikan implikasi praktis bagi pengembangan adsorben selektif untuk pengolahan limbah yang mengandung logam berat.

Kata Kunci: Adsorpsi Zn2+; *Ion Imprinted Polymers*; Monomer Fungsional; *Crosslinker*; Fotopolimerisasi

PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan oleh logam berat, termasuk ion Zn^{2+}, merupakan isu penting yang terus mendapat perhatian karena peningkatan aktivitas industri dan potensi dampak toksiknya terhadap ekosistem serta kesehatan manusia (Zhu, 2025)(Abd Elnabi et al., 2023). Meskipun Zn merupakan unsur esensial, konsentrasi berlebih dapat menyebabkan gangguan biologis, sehingga diperlukan metode pemisahan yang efektif dan selektif (Dobrikova et al., 2022)(Schoofs et al., 2024). Di antara berbagai teknik yang ada, adsorpsi menggunakan material berbasis polimer selektif menjadi pendekatan yang menjanjikan karena efisiensi, kemudahan operasional, dan biaya yang relatif rendah (Seida & Tokuyama, 2022)(Ge et al., 2023). Dalam hal ini, *Ion Imprinted Polymers* (IIPs) dikembangkan sebagai material dengan

kemampuan pengenalan spesifik terhadap ion target melalui pembentukan rongga cetakan yang komplementer secara ukuran, bentuk, dan sifat kimia. Keberhasilan pembentukan situs aktif pada IIPs sangat dipengaruhi oleh interaksi antara ion template dan monomer fungsional, serta kestabilan struktur tiga dimensi yang dibentuk oleh agen pengikat silang (*crosslinker*) (Du et al., 2024)(Kusumkar et al., 2021)(Mabaso et al., 2024). Oleh karena itu, pengaturan komposisi kedua komponen tersebut menjadi faktor krusial dalam menentukan kinerja adsorpsi dan selektivitas material.

Berbagai studi terdahulu telah melaporkan penggunaan *methacrylic acid* (MAA) sebagai monomer fungsional dan *ethylene glycol dimethacrylate* (EGDMA) sebagai *crosslinker* dalam sintesis IIPs-Zn^{2+}, dengan hasil yang menunjukkan bahwa variasi komposisi berpengaruh terhadap kapasitas adsorpsi dan selektivitas. Studi yang dilakukan oleh (Zhakina et al., 2024)(Cegłowski et al., 2022)(Djunaidi et al., 2024) melaporkan bahwa kombinasi MAA dan EGDMA efektif dalam membentuk situs imprinting yang stabil dan selektif melalui interaksi kuat antara gugus karboksilat monomer dengan ion logam serta pembentukan jaringan polimer yang kaku dan terorganisasi. Namun, sebagian besar studi masih terbatas pada penggunaan rasio tertentu tanpa optimasi sistematis, serta lebih dominan menggunakan metode polimerisasi termal dibandingkan fotopolimerisasi yang menawarkan keunggulan seperti waktu reaksi lebih singkat dan kontrol proses yang lebih baik (Alizar et al., 2025)(Bongiovanni et al., 2021)(Li et al., 2023). Hal ini mengindikasikan adanya kesenjangan penelitian dalam pengembangan IIPs-Zn^{2+} berbasis fotopolimerisasi dengan komposisi monomer dan *crosslinker* yang dioptimasi. Berdasarkan teori *imprinting* non-kovalen, keseimbangan interaksi antara gugus fungsional monomer dan ion *template* serta tingkat kerapatan jaringan polimer yang dihasilkan oleh *crosslinker* akan menentukan kualitas dan stabilitas situs pengikatan (Hasanah et al., 2021)(Hong et al., 2024). Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada optimasi perbandingan monomer fungsional dan *crosslinker* dalam sintesis IIPs-Zn^{2+} menggunakan metode fotopolimerisasi, dengan tujuan memperoleh material yang memiliki selektivitas tinggi, kapasitas adsorpsi optimal, dan stabilitas yang baik untuk aplikasi pemisahan ion logam berat.

METODE

Penelitian ini termasuk ke dalam pendekatan kuantitatif karena berfokus pada optimasi variasi perbandingan monomer fungsional methacrylic acid (MAA) dan pengikat

silang ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) dalam sintesis IIPs-Zn2+, dengan mengevaluasi kapasitas adsorpsi yang dihasilkan terhadap ion Zn2+ sebagai parameter kinerja material.

Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini ialah cawan petri, botol vial, pipet volume, mikropipet, gelas kimia, spatula, labu ukur, botol semprot, corong kaca, timbangan analitik. Sedangkan instrumen yang digunakan pada penelitian ini ialah fotopolimerisator, sonikator, FTIR, dan AAS. Bahan yang dipakai dalam penelitian ini meliputi seng nitrat heksahidrat (Zn(NO3)2.6H2O) sebagai molekul target, methacrylic acid (MAA) sebagai monomer fungsional, ethylene glycol dimethylacrylate (EGDMA) sebagai crosslinker, 2-2-dimethoxy-2-phenylacetophenone (DMPP) sebagai initiator, nitric acid (HNO3) 1M, natrium hidroksida (NaOH) 0.1M, dan Aquades.

Prosedur Kerja

Sebanyak 5 mg ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$) ditimbang dan dimasukkan ke dalam botol vial. Selanjutnya, ke dalam botol vial yang telah berisi ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$), ditambahkan *methacrylic acid* (MAA) dalam jumlah optimum, diikuti dengan penambahan *ethylene glycol dimethacrylate* (EGDMA) dalam jumlah optimum, serta 0,03 *gram 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone* (DMPP). Campuran tersebut kemudian disonikasi selama 60 menit untuk memastikan homogenitas. Setelah larutan homogen, larutan tersebut dipindahkan ke dalam cawan petri dan dilakukan proses polimerisasi dengan paparan sinar UV sambil dialiri gas nitrogen secara kontinu selama 10 menit (Julita et al., 2021). Sebagai pembanding, disintesis pula *Non-imprinted Polymer* (NIP) tanpa penambahan zat *template* (Zn^{2+}), menggunakan prosedur yang sama. Setelah proses sintesis selesai, hasil berupa IIPs-Zn^{2+} dan NIP dianalisis menggunakan instrumen FTIR.

Pada penelitian ini dilakukan percobaan membuat IIPs-Zn dengan variasi monomer fungsional dan pengikat silang. Adapun cara untuk mendapatkan perbandingan yang optimum dari jumlah MAA dan EGDMA dilakukan percobaan sesuai data pada Tabel 1 sebagai berikut.

Tabel 1. Perbandingan MAA dan EGDMA

MAA (mmol)	EGDMA (mmol)
5	15
10	15
15	15
20	15
25	15
Optimum	5
Optimum	10
Optimum	15
Optimum	20
Optimum	25

Analisis Data

Polimer IIPs-Zn^{2+} dengan variasi perbandingan MAA dan EGDMA yang telah terbentuk, masing-masing sebanyak 0.1 g IIPs-Zn^{2+}, diekstraksi selama 1 jam menggunakan pelarut asam nitrat 1M sebanyak 10 mL untuk melepaskan ion *template* Zn^{2+} yang terdapat dalam polimer sehingga terbentuk rongga spesifik yang mampu mengikat kembali ion target Zn^{2+}. Selanjutnya, IIPs dikontakkan dengan larutan Zn^{2+} sebanyak 10 mL dengan konsentrasi 50 ppm selama 1 jam. Larutan Zn^{2+} setelah proses kontak kemudian dianalisis menggunakan AAS untuk menentukan konsentrasi akhir, yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan kapasitas adsorpsi dengan rumus sebagai berikut (Julita et al., 2021).

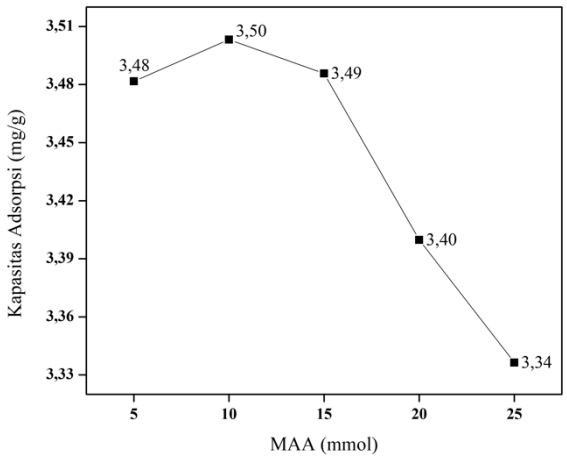
$$Q = \frac{V(C_0 - C_1)}{m}$$

Q adalah kapasitas adsorpsi (mg/g), C_0 adalah konsentrasi awal larutan (mg/L), C_1 adalah konsentrasi akhir larutan (mg/L), V adalah volume larutan (L), m adalah massa adsorben (g).

HASIL

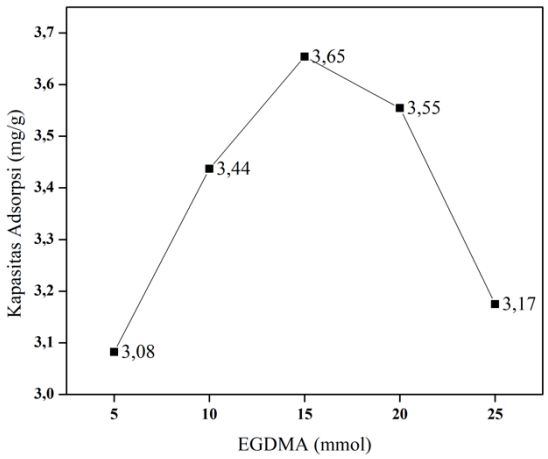
Pada penelitian ini dilakukan optimasi perbandingan methacrylic acid (MAA) dan ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) dengan tujuan memperoleh komposisi terbaik antara monomer fungsional dan pengikat silang dalam sintesis IIPs-Zn2+. Optimasi ini dilakukan untuk menghasilkan material dengan kinerja adsorpsi yang optimal terhadap ion Zn2+, yang dievaluasi berdasarkan nilai kapasitas adsorpsi tertinggi. Pada tahap awal, sintesis

IIPs dilakukan dengan memvariasikan jumlah MAA sebesar 5, 10, 15, 20, dan 25 mmol, sementara jumlah EGDMA dijaga konstan. Pengaruh variasi jumlah MAA terhadap kapasitas adsorpsi Zn2+ kemudian dianalisis dan disajikan dalam bentuk grafik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pengaruh jumlah MAA terhadap kapasitas adsorpsi Zn

Pada tahap selanjutnya, sintesis IIPs-Zn2+ dilakukan dengan memvariasikan jumlah ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) sebagai pengikat silang, yaitu sebesar 5, 10, 15, 20, dan 25 mmol, dengan jumlah methacrylic acid (MAA) dipertahankan pada kondisi optimum. Variasi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh jumlah crosslinker terhadap kapasitas adsorpsi ion Zn2+. Hasil pengujian kemudian disajikan dalam bentuk grafik yang menunjukkan hubungan antara jumlah EGDMA dan kapasitas adsorpsi, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh jumlah EGDMA terhadap kapasitas adsorpsi Zn

PEMBAHASAN

Ion Imprinted Polymers (IIPs) merupakan material polimer selektif yang disintesis menggunakan ion logam sebagai template untuk membentuk rongga pengikatan yang spesifik dan komplementer terhadap ukuran, bentuk, serta sifat kimia ion target (Kusumkar et al., 2021)(Mabaso et al., 2024). Dalam proses sintesisnya, monomer fungsional yang umum digunakan meliputi *methacrylic acid* (MAA), *acrylic acid* (AA), dan *4-vinylpyridine* (4-VP), sedangkan pengikat silang (*crosslinker*) yang sering digunakan antara lain *ethylene glycol dimethacrylate* (EGDMA), *divinylbenzene* (DVB), dan *trimethylolpropane trimethacrylate* (TRIM) (Hasanah et al., 2021). Pemilihan jenis monomer fungsional berperan penting dalam membentuk interaksi spesifik dengan ion *template*, sementara *crosslinker* menentukan kekakuan dan stabilitas struktur tiga dimensi polimer yang terbentuk. Kombinasi *methacrylic acid* (MAA) dan *ethylene glycol dimethacrylate* (EGDMA) banyak dipilih karena MAA memiliki gugus karboksilat yang mampu berinteraksi kuat dengan ion logam, sedangkan EGDMA menghasilkan jaringan polimer yang kaku dan stabil (Cajamarca & Tarley, 2022)(Agibayeva et al., 2025). Dengan demikian, penggunaan MAA dan EGDMA diharapkan mampu menghasilkan IIPs dengan selektivitas tinggi serta kapasitas adsorpsi yang optimal.

Berdasarkan gambar 1, variasi jumlah *methacrylic acid* (MAA) sebagai monomer fungsional berpengaruh signifikan terhadap kapasitas adsorpsi IIPs-Zn^{2+}, di mana peningkatan kapasitas terjadi dari 5 mmol hingga mencapai nilai optimum pada 10 mmol sebesar 3,50 mg/g karena bertambahnya jumlah gugus karboksilat (-COOH) yang mampu berinteraksi dengan ion Zn^{2+} sehingga membentuk kompleks monomer-template yang optimal dan menghasilkan lebih banyak situs *imprinting* yang spesifik (Mabaso et al., 2024). Namun, peningkatan jumlah MAA lebih lanjut hingga 15 mmol menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi akibat kelebihan monomer yang membentuk struktur polimer lebih padat dan kurang teratur, sehingga sebagian situs aktif tertutup atau sulit diakses serta kestabilan rongga *imprinting* menurun, yang pada akhirnya mengurangi efisiensi dan selektivitas pengikatan ion Zn^{2+} (Mueller, 2021)(Agibayeva et al., 2025).

Berdasarkan gambar 2, variasi jumlah *ethylene glycol dimethacrylate* (EGDMA) sebagai pengikat silang memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kapasitas adsorpsi IIPs-Zn^{2+}, di mana peningkatan kapasitas adsorpsi terjadi seiring bertambahnya jumlah EGDMA hingga mencapai kondisi optimum pada 15 mmol dengan kapasitas sebesar 3,65 mg/g. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kerapatan jaringan polimer yang terbentuk sehingga struktur

menjadi lebih kaku dan mampu mempertahankan bentuk serta stabilitas rongga *imprinting* secara optimal, yang pada akhirnya meningkatkan jumlah dan kualitas situs pengikatan terhadap ion Zn^{2+} (Lazar et al., 2023). Namun, peningkatan jumlah EGDMA lebih lanjut hingga 20 mmol menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi, yang dapat dijelaskan oleh terbentuknya struktur polimer yang terlalu padat dan memiliki porositas rendah, sehingga menghambat difusi ion Zn^{2+} menuju situs aktif serta menurunkan aksesibilitas rongga *imprinting* (Mueller, 2021). Selain itu, jumlah *crosslinker* yang berlebihan juga dapat mengurangi fleksibilitas jaringan polimer dan menyebabkan sebagian situs pengikatan menjadi kurang efektif (Lazar et al., 2023). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa jumlah EGDMA yang optimum diperlukan untuk mencapai keseimbangan antara kestabilan struktur dan kemudahan akses ion ke dalam situs pengikatan, yang dalam penelitian ini diperoleh pada 15 mmol.

Keterbatasan dalam penelitian ini adalah bahwa perbandingan monomer fungsional (MAA) dan pengikat silang (EGDMA) yang diperoleh bersifat spesifik untuk ion template Zn2+. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengkaji perbandingan optimum antara monomer fungsional dan pengikat silang pada ion logam lainnya, sehingga dapat diperluas aplikasinya dalam proses adsorpsi berbagai jenis ion logam selain Zn2+.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian variasi jumlah MAA dan EGDMA diperoleh perbandingan optimum untuk sintesis IIPs-Zn sebesar 10 mmol MAA : 15 mmol EGDMA dengan kapasitas adsorpsi masing-masing 3.50 mg/g untuk MAA dan 3.65 mg/g untuk EGDMA. Temuan ini memberikan kontribusi terhadap pemahaman mengenai pengaruh jumlah monomer fungsional dan crosslinker terhadap bentuk dan stabilitas polimer yang dihasilkan, serta menunjukkan bahwa IIPs-Zn yang dihasilkan dapat digunakan untuk pengikatan ion Zn2+ secara selektif. Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah mengoptimalkan rasio MAA dan EGDMA menggunakan molekul template lain agar dapat menghasilkan polimer IIPs yang efektif sebagai adsorben untuk ion logam atau zat lain.

DAFTAR PUSTAKA

Abd Elnabi, M. K., Elkaliny, N. E., Elyazied, M. M., Azab, S. H., Elkhalifa, S. A., Elmasry, S., Mouhamed, M. S., Shalamesh, E. M., Alhorieny, N. A., Abd Elaty, A. E., Elgendy, I. M., Etman, A. E., Saad, K. E., Tsigkou, K., Ali, S. S., Kornaros, M., & Mahmoud,

Y. A. G. (2023). Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A review. *Toxics, 11*(7), Article 580. https://doi.org/10.3390/toxics11070580

Agibayeva, L., Melnikov, Y., Kubiyeva, D., & Kondaurov, R. (2025). Impact of crosslinking agent on sorption properties of molecularly imprinted polymers in relation to silver. *Polymers, 17*(15), Article 2055. https://doi.org/10.3390/polym17152055

Alizar, U., Djaha, N. A., Mawardi, Suryani, O., Dewata, I., Safitri, E., Hidayat, N., Hanifah, S. A., & Hassan, R. A. (2025). Synthesis and characterization of molecularly imprinted polymers (MIPs) as adsorbents for methylene blue dye. *Rasayan Journal of Chemistry, 18*(1), 352–359. https://rasayanjournal.co.in/abstract.php?id=4439

Bongiovanni, R., Dalle Vacche, S., & Vitale, A. (2021). Photoinduced processes as a way to sustainable polymers and innovation in polymeric materials. *Polymers, 13*(14), Article 2293. https://doi.org/10.3390/polym13142293

Cajamarca, F. A., & Tarley, C. R. T. (2022). Influence of synthesis parameters and polymerization methods on the selective and adsorptive performance of bio-inspired ion imprinted polymers. *Separations, 9*(10), Article 266. https://doi.org/10.3390/separations9100266

Cegłowski, M., Kurczewska, J., Lusina, A., Nazim, T., & Ruszkowski, P. (2022). EGDMA- and TRIM-based microparticles imprinted with 5-fluorouracil for prolonged drug delivery. *Polymers, 14*(5), Article 1027. https://doi.org/10.3390/polym14051027

Djunaidi, M. C., Putri, V. R., Maharani, N. D., Lusiana, R. A., Siahaan, P., & Sunarno, S. (2024). Precipitation polymerization-based molecularly imprinted polymers: A novel approach for transdermal curcumin delivery. *Polymers, 16*(24), Article 3456. https://doi.org/10.3390/polym16243456

Dobrikova, A., Apostolova, E., Adamakis, I.-D. S., Hanć, A., Sperdouli, I., & Moustakas, M. (2022). Combined impact of excess zinc and cadmium on elemental uptake, leaf anatomy and pigments, antioxidant capacity, and function of photosynthetic apparatus in clary sage (*Salvia sclarea* L.). *Plants, 11*(18), Article 2407. https://doi.org/10.3390/plants11182407

Du, M., Xu, Z., Xue, Y., Li, F., Bi, J., Liu, J., Wang, S., Guo, X., Zhang, P., & Yuan, J. (2024). Application prospect of ion-imprinted polymers in harmless treatment of heavy metal wastewater. *Molecules, 29*(13), Article 3160. https://doi.org/10.3390/molecules29133160

Ge, H., Ding, K., Guo, F., Wu, X., Zhai, N., & Wang, W. (2023). Green and superior adsorbents derived from natural plant gums for removal of contaminants: A review. *Materials, 16*(1), Article 179. https://doi.org/10.3390/ma16010179

Hasanah, A. N., Safitri, N., Zulfa, A., Neli, N., & Rahayu, D. (2021). Factors affecting preparation of molecularly imprinted polymer and methods on finding template-monomer interaction as the key of selective properties of the materials. *Molecules, 26*(18), Article 5612. https://doi.org/10.3390/molecules26185612

Hong, D., Wang, C., Gao, L., & Nie, C. (2024). Fundamentals, synthetic strategies and applications of non-covalently imprinted polymers. *Molecules, 29*(15), Article 3555. https://doi.org/10.3390/molecules29153555

Julita, E., Ulianas, A., Ahmad, M. S., Isa, I. M., Yulkifli, Ling, T. L., Yolanda, Y., Nurlely, & Rezayi, M. (2021). Molecularly imprinted polymeric microspheres for

electrochemical sensing of cholesterol. *Rasayan Journal of Chemistry, 14*(3), 1462–1468. https://rasayanjournal.co.in/admin/php/upload/3222_pdf.pdf

Kusumkar, V. V., Galamboš, M., Viglašová, E., Daňo, M., & Šmelková, J. (2021). Ion-imprinted polymers: Synthesis, characterization, and adsorption of radionuclides. *Materials, 14*(5), Article 1083. https://doi.org/10.3390/ma14051083

Lazar, M. M., Ghiorghita, C. A., Dragan, E. S., Humelnicu, D., & Dinu, M. V. (2023). Ion-imprinted polymeric materials for selective adsorption of heavy metal ions from aqueous solution. *Molecules, 28*(6), Article 2798. https://doi.org/10.3390/molecules28062798

Li, Y., Zhang, X., Zhang, X., Zhang, Y., & Hou, D. (2023). Recent progress of the vat photopolymerization technique in tissue engineering: A brief review of mechanisms, methods, materials, and applications. *Polymers, 15*(19), Article 3940. https://doi.org/10.3390/polym15193940

Mabaso, N. B., Nomngongo, P. N., & Nyaba, L. (2024). Recent advances in synthesising and applying magnetic ion-imprinted polymers to detect, pre-concentrate, and remove heavy metals in various matrices. *Processes, 12*(8), Article 1601. https://doi.org/10.3390/pr12081601

Mueller, A. (2021). A note about crosslinking density in imprinting polymerization. *Molecules, 26*(17), Article 5139. https://doi.org/10.3390/molecules26175139

Schoofs, H., Schmit, J., & Rink, L. (2024). Zinc toxicity: Understanding the limits. *Molecules, 29*(13), Article 3130. https://doi.org/10.3390/molecules29133130

Seida, Y., & Tokuyama, H. (2022). Hydrogel adsorbents for the removal of hazardous pollutants—Requirements and available functions as adsorbent. *Gels, 8*(4), Article 220. https://doi.org/10.3390/gels8040220

Zhakina, A. K., Vassilets, Y. P., Arnt, O. V., & Zhakin, A. M. (2024). Synthesis and study of sorption properties of zinc-imprinted polymer. *Polymers, 16*(24), Article 3545. https://doi.org/10.3390/polym16243545

Zhu, D. (2025). Heavy metal contamination and its effects on ecosystems and human health: Challenges and solutions. *Toxics, 13*(10), Article 837. https://doi.org/10.3390/toxics13100837